

Untersuchung des Einflusses der geometrischen Abmessungen eines Monopiles auf den Schalldruckpegel während einer Offshore-Pfahlrammung

Kristof Heitmann, Tristan Lippert, Stephan Lippert, Otto von Estorff

Institut für Modellierung und Berechnung, Technische Universität Hamburg, 21073 Hamburg, Deutschland

Email: k.heitmann@tuhh.de

Einleitung

Das Ziel der Bundesregierung ist es, die Energiewende voranzutreiben und dadurch die Treibhausgasemission massiv zu senken. Eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung dieser Pläne spielt die Offshore-Windenergie. Stand der Technik bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen ist die Pfahlrammung. Somit werden bei der Errichtung der Anlagen Pfähle bis zu 50 Meter in den Meeresboden gerammt. Durch diesen Vorgang kommt es zur Ausbreitung von Unterwasserschallwellen, die einen Schalldruckpegel von bis zu 220 dB erreichen können. Um Unterwasserlebewesen, wie zum Beispiel den Schweinswal, zu schützen, wurden Grenzwerte für den Rammschall vom Bundesumweltministerium eingeführt. In der ausschließlichen deutschen Wirtschaftszone werden Offshore-Windenergieparks an unterschiedlichsten Standorten errichtet, so dass verschiedene Konzepte zur Errichtung verfolgt werden. Bis in Wassertiefen von 40 Metern finden Monopiles eine Verwendung.

In der Vergangenheit wurde bereits die numerische Modellierung der Pfahlrammung diskutiert. Hierbei sind zum Beispiel die Veröffentlichungen von Steinhagen und Moosrainer, Reinhall und Dahl und Milatz et al. zu nennen [1]-[3]. In diesen Veröffentlichungen werden unterschiedliche Modellierungsstrategien für die Umgebung nahe dem Pfahl vorgestellt. Jedoch konnten in keiner der bisherigen Arbeiten sowohl die Eingangsgrößen, wie die eingebrachte Kraft der Ramme, als auch der Schalldruck im Wasser validiert werden.

In diesem Beitrag wird zunächst ein Finite-Elemente-Modell (FEM) zur Vorhersage des Schalldrucks im Nahfeld vorgestellt und anhand von Messdaten validiert. Anschließend werden mit Hilfe des Modells Skalierungsgesetze zur Vorhersage des Schalldruckpegels für verschiedene Pfahlgeometrien vorgestellt. Aufgrund der Erfahrung, gewonnen durch Messungen, wird vermutet, dass die Nichtlinearitäten, hervorgerufen durch den Boden und die Ramme, vernachlässigt werden können. In Abbildung 1 ist der skalierte Schalldruck für zwei verschiedene Energien des Hammers dargestellt. Hierbei wird der Schalldruck mit der aus der Energie der Ramme resultierenden Geschwindigkeit skaliert. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung des skalierten Schalldrucks der beiden Messungen festzustellen.

FEM-Modell

Im gegenwärtigen Beitrag wird ein 2D-rotationssymmetrischer Ansatz für das FEM-Modell

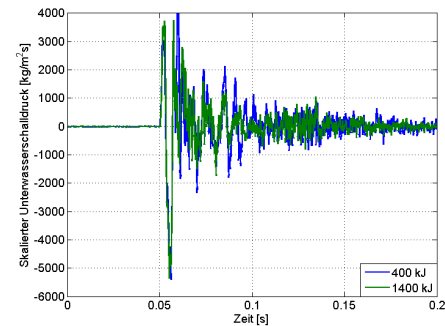


Abbildung 1: Skalierter Schalldruck bei einer Einbindelänge von 5 m (400 kJ) und 15 m (1400 kJ)

verwendet. Weiterhin wird ein explizites Zeitintegrationschema eingesetzt um den impulsartigen Charakter der Pfahlrammung abzubilden. Das Modell besteht hierbei aus dem Pfahl, dem Wasser, dem Boden und der Ramme. Besonderes Augenmerk ist hierbei auf den Kontakt zwischen Ramme und Pfahl zu richten, denn durch diesen wird der Energieeintrag in den Pfahl gewährleistet.

Wie in der Einleitung bereits beschrieben, wird zunächst das Modell validiert, um verlässliche Aussagen bezüglich der Skalierungsgesetze treffen zu können. Hierfür ist in den Abbildungen 2 und 3 die Pfahlkopfgeschwindigkeit, welche eine Validierung der eingebrachten Energie erlaubt, und der Schalldruck im Wasser, welcher eine korrekte Wiedergabe der Übertragungswege der Energie bestätigt, der Simulationen den Messungen gegenüber gestellt.

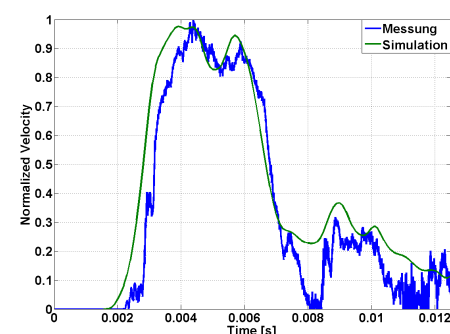


Abbildung 2: Gegenüberstellung der normalisierten Pfahlkopfgeschwindigkeit der Messung und der Simulation

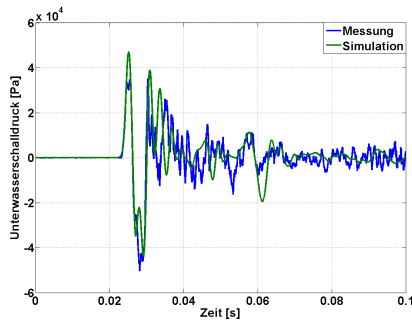


Abbildung 3: Gegenüberstellung der Messung und der Simulation des Unterwasserschalldrucks in einer Entfernung von 30 m zum Pfahl

Für beide Größen ist eine sehr gute Übereinstimmung der Simulation mit der Messung zu erkennen.

Skalierungsgesetze

Nachdem das Modell validiert ist, können nun Vorschriften für die Skalierung des Schalldrucks hergeleitet werden. In Abbildung 4 ist der skalierte Schalldruck für verschiedene Energien der Ramme und verschiedene Pfahldurchmesser aufgetragen. Hierbei ist der Schalldruck mit der aus der eingebrachten Energie resultierenden Geschwindigkeit und einer infinitesimalen Pfahlmantelfläche $A_p = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dx$ skaliert, wobei r der Pfahlradius und dx eine infinitesimale Pfahllänge ist. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung der Verläufe des Schalldrucks zu erkennen. Die Kurven weichen erst ab 0,05 s leicht voneinander ab. Dieses ist mit dem verwendeten nicht-linearen Stoffgesetz des Bodens zu erklären.

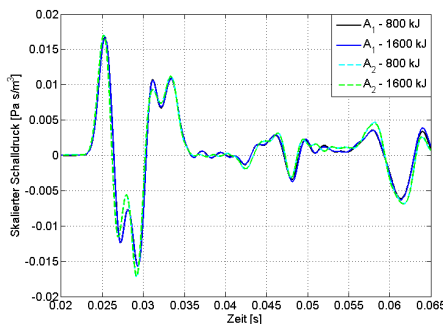


Abbildung 4: Skalierter Schalldruckpegel für verschiedene Energien und Pfahldurchmesser

Anschließend wird die Wasserhöhe variiert. Hierbei konnte kein Einfluss für den Schalldruck im Bereich nahe dem Pfahl festgestellt werden. Dieser Zusammenhang kann mit der infinitesimalen Pfahlmantelfläche A_p , mit der der Schalldruck im Nahfeld skaliert, erklärt werden. Diese Größe hängt nicht von der Pfahllänge ab

Validierung

Um die gefundenen Skalierungsgesetze zu validieren, wird zunächst ein Pfahl mit einem Durchmesser von 2,5 m simuliert. Anschließend werden nun die Ergebnisse auf einen Pfahl mit einem Durchmesser von 3,35

m übertragen und mit Messergebnissen verglichen. Die Ergebnisse für den Einzelereignis-Schalldruckpegel und Spitzenpegel, gewonnen aus der Skalierung und aus der Messung, sind in Abbildung 5 dargestellt. Hierbei ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Größen zu erkennen. Die Abweichungen sind kleiner als 2 dB.

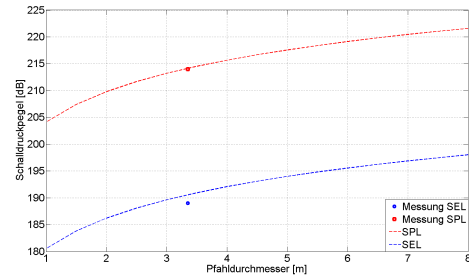


Abbildung 5: Darstellung des SEL und SPL berechnet aus den Skalierungsgesetzen verglichen mit den Messergebnissen

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde zunächst ein FEM-Modell zur Vorhersage des Schalldruckpegels in der Nähe eines im Wasser gerahmten Pfahls vorgestellt. Anschließend wurden Skalierungsvorschriften aus dem Modell hergeleitet. Hierbei konnte gezeigt werden, dass der Schalldruck linear skaliert werden kann und die Nicht-Linearitäten des Bodens und der Ramme vernachlässigt werden können. Anhand von Messungen wurden abschließend die Gesetze validiert.

In zukünftigen Arbeiten soll der Einfluss eines Schallschutzsystems untersucht und in die Skalierungsgesetze implementiert werden. Weiterhin gilt es, den Einfluss des Massenverhältnisses von Rammhaube zu Rammmasse auf den Schalldruck zu untersuchen.

Danksagung

Die Forschungsaktivitäten im Rahmen des Projekts BORRA werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages (FKZ 0325421A) gefördert.

Literatur

- [1] Steinhagen U. and Moosrainer M., Forecasting underwater noise - simulation soundly predicts hydroacoustics during offshore pile driving, *Ansys Advantage* **5** (2), 16–17, (2011).
- [2] Reinhall, P.G. and Dahl, P.H., Underwater Mach wave radiation from impact pile driving: Theory and observation, in *Journal of the Acoustical Society of America* **130**, 1209–1216, (2011).
- [3] Milatz, M., Reimann, K. and Grabe, J., Numerical simulations of hydro emissions due to offshore pile driving, *Proceedings of the 7th International Conference on Offshore Site Investigation and Geotechnics (OSIG)*, London, England, (2012).